

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Návrh a ověření svarového spoje z materiálu 08Ch18N10T
pro jadernou energetiku.

The Design and Certification of Welded Joint Made from Material
08Ch18N10T for Nuclear Power.

Student:

Bc. David Scheffczik

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.

Ostrava: 21. května 2012

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. David Scheffczik**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Specializace: 20 Strojírenská technologie

Téma: **Návrh a ověření svarového spoje z materiálu 08Ch18N10T pro jadernou energetiku**
The Design and Certification of Welded Joint Made from Material 08Ch18N10T for Nuclear Power

Zásady pro vypracování:

1. Studium svařitelnosti materiálu 08Ch18N10T pro jadernou energetiku.
2. Návrh rozměrů svarových spojů s ohledem na schvalování postupů WPQR a svářečů dle EN 15614-1, EN 15 613, PN AE G-7-009-87, PN AE G-7-010-87, NTD A.S.I, PED-ES97/23 EC a ČSN EN 13 480.
3. Provedení svarových spojů v provozních podmínkách a jejich vyhodnocení.
4. Vyhodnocení výsledků a zpracování WPQR a WPS.

Seznam doporučené odborné literatury:

HRIVŇÁK, I. *Teoria zvariteľnosti kovov a zliatin*. Bratislava: Veda, 1989, 344 s. ISBN 80-224-0016-5.

PTÁČEK, L. A KOL. *Nauka o materiálu I.*. Praha: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2001, 505 s. ISBN 80-7204-193-2.

PTÁČEK, L. A KOL. *Nauka o materiálu II.*. Praha: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001, 350 s. ISBN 80-7204-130-4.

HLAVATÝ, I. *Teorie a technologie svařování*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009, poslední revize 20. 10. 2011. Dostupné z: < <http://fs1.vsb.cz/~hla80> >. ISBN 978-80-248-2414-7.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012


prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu. Dále prohlašuji, že podklady poskytnuté podnikem ARMATURY Group a.s. Dolní Benešov, nebudou dále použity v žádné publikaci.

V Ostravě 21.5.2012



.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 21.5.2012



David Scheffczik
Kašpara Peterka 251
Kravaře 74721

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

SCHEFFCZIK, D. *Návrh a ověření svarového spoje z materiálu 08Ch18N10T pro jadernou energetiku*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2010, 52 s. Vedoucí práce: Hlavatý, I.

Diplomová práce se zabývá možnostmi svařování oceli 08Ch18N10T ve společnosti Armatury Group a.s. Dolní Benešov. Součástí této práce je návrh rozměrů svarových spojů v souladu s platnými normami. Dále návrh přídavných materiálů a provedení zkušebních svarových spojů. Zkušební svary jsou provedeny metodou svařování autorem pod tavidlem (121). Vzorky byly podrobeny destruktivním a nedestruktivním zkouškám. Výsledkem diplomové práce je vyhodnocení výsledků svařování homogenního spoje ocelí a návrh protokolu WPQR a WPS.

ANNOTATION OF THESIS

SCHEFFCZIK, D. *The Design and Certification of Welded Joint Made from Material 08Ch18N10T for Nuclear Power*. Ostrava: VŠB-Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2010, 52 p. Thesis head: Hlavatý, I.

The thesis deals with the possibilities of welding joint made from material 08Ch18N10T in Armatury Group a.s. Dolní Benešov. Part of this work is to design dimensions of welded joints in accordance with current standards. Next part is design welding material and performance testing of welded joints. Test welded are performed by SAW (121). Samples were submitted destructive and joint welding of steel and design of protocol WPQR and WPS.

Obsah

	strana
0 Úvod	9
1 Studium svařitelnosti materiálu 08Ch18N10T pro jadernou energetiku.....	11
1.1 Vysokolegované korozivzdorné oceli	11
1.2 Struktura vysokolegovaných ocelí.....	13
1.3 Vliv legujících prvků na strukturu a svařitelnost ocelí.....	16
1.4 Svařitelnost oceli	17
1.5 Svařitelnost austenitické oceli	17
1.6 Mezihousesnková teplota	20
1.7 Vnesené teplo	20
1.8 Technologie svařování používané v jaderné energetice	21
1.8.1 Ruční obloukové svařování tavící se elektrodou	22
1.8.2 Svařování automatem pod tavidlem drátovou elektrodou	23
1.8.3 Svařování tavící se elektrodou v inertním plynu.....	26
1.9 Příprava svarových ploch	27
2 Korozní odolnost austenitických ocelí	29
3 Volba vhodné technologie svařování	32
3.1 Austenitická ocel 08Ch18N10T	32
3.2 Technologie svařování.....	33
3.3 Svařovací materiály	33
3.4 Manipulace, skladování a přesušování přídavných materiálů	35
3.5 Kvalifikace svářečského personálu	35
4 Návrh rozměrů svarového spoje.....	36
5 Provedení svarového spoje v provozních podmínkách	38
5.1 Příprava svarových ploch	38
5.2 Volba parametrů svařování.....	38
5.3 Stehování a dočasné technologické upínky	38
5.4 Technologický postup svařování zkušebního svaru	40
6 Vyhodnocení výsledků svarového spoje.	41
6.1 Výsledky nedestruktivních zkoušek	42
6.2 Výsledky destruktivních zkoušek.....	43
6.2.1 Zkouška tahem příčná	43
6.2.2 Zkouška lámavosti	43

6.2.3	Zkouška rázem v ohybu	44
6.3	Metalografické výsledky	44
6.3.1	Hodnocení makrostruktury.....	44
6.3.2	Hodnocení proti mezikrystalové korozi	45
6.3.3	Stanovení feritového čísla	46
6.3.4	Stanovení podílu δ -feritu	46
6.4	Výsledky chemického složení	47
7	Zhodnocení	48
8	Seznam použité literatury	50
9	Seznam příloh	52

Seznam použitých značek a symbolů

111	ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (SMAW)	
121	metoda svařování automatem pod tavidlem (SAW)	
131	svařování tavící se elektrodou v inertním plynu (MIG)	
BNS	bezpečnostní návody a směrnice	
ČSN	české technické normy	
GOST	ruské technické normy	
JE MO	jaderná elektrárna Mochovce	
VVER 440	vodo-vodní energetický reaktor typu 440	
VZJZ	výrobní zařízení jaderných zařízení	
WPQR	záznam o kvalifikaci postupu svařování	
WPS	specifikace postupu svařování	
pWPS	předběžná specifikace postupu svařování	
A	tažnost	[%]
I	elektrický proud	[A]
Q	tepelný příkon	[kJ.mm ⁻¹]
Rm	mez pevnosti	[MPa]
Rp0,2	smluvní mez kluzu	[MPa]
U	elektrické napětí	[V]
v	rychlost svařování	[cm.min ⁻¹]
k	koeficient tepelné účinnosti	[-]

0 Úvod

V současné době lze svařování vysokolegovaných ocelí uplatnit v oblastech chemického průmyslu, dopravy, ale i energetiky a to zejména jaderné. Novou oblastí pro strojírenské firmy je dostavba 3. a 4. reaktoru slovenské jaderné elektrárny Mochovce typu VVER 440. Při stavbě takového projektu je potřeba mnoho armatur na primární, sekundární a další pomocné okruhy. Na tyto armatury jsou kladeny nejprísnejší bezpečnostní požadavky, proto jsou požadovány vysoce odolné materiály.

Je třeba si uvědomit, že konstrukční a výrobně-technologická dokumentace pochází z 80-tých let minulého století. Svařovací materiály specifikované v této dokumentaci se již nevyrábějí a musí být nahrazeny materiály vykazujícími ekvivalentní vlastnosti s původními. Veškerá nově vyráběná zařízení musí splňovat platné bezpečnostní normy a směrnice vydané úřadem jaderného dozoru Slovenské republiky.

Armatury Group a.s. je společnost, která má příslušné zkušenosti v oblasti výroby armatur. Zabývá se dodávkou armatur pro dostavbu výše zmíněné elektrárny. Z tohoto důvodu bylo potřeba vytvořit atestační svar a podrobit ho předepsaným zkouškám, aby se ověřily mechanické a chemické vlastnosti svarového spoje.

Armatury jsou vystaveny různým pracovním tlakům, teplotám, pracovnímu prostředí a podobně. Nejčastějším přepravovaným médiem bývá voda, plyn, pára a různé chemické látky. Pro tyto agresivní média a prostředí je potřeba použití korozivzdorných materiálů. V daném případě se jedná o svarový spoj na zpětné klapce, kde je těsnící sedlo vařeno k tělesu armatury. Tento svar musí splňovat podmínky pro tlakové nádoby a přísné předpisy pro jadernou energetiku. Těleso armatury je odlitek z austenitické korozivzdorné oceli.

Před zahájením svařovacího procesu musí být stanoven platný postup svařování, který musí být vyhotoven podle platných podmínek dle ČSN EN nebo podle daných zahraničních norem. Při kontrole a hodnocení svarových spojů se musí kontrolní orgány řídit prováděcími předpisy. Veškeré podmínky a parametry k provádění těchto zkoušek jsou uváděny v národních, evropských nebo mezinárodních technických normách.

Tato práce se zabývá návrhem a ověřením homogenního svarového spoje z materiálu 08Ch18N10T. Jedná se o svarový spoj na výrobku z austenitické korozivzdorné oceli, který je určený pro jadernou energetiku.

Ve společnosti Armatury Group a.s. vznikl požadavek na ověření svařitelnosti materiálu 08Ch18N10T. Jedná se o svarový spoj mezi těsnícím sedlem a tělesem armatury. Ocel se řadí do skupiny vysokolegovaných austenitických ocelí. Vyniká svými antikorozními vlastnostmi, což umožňuje použití v energetickém průmyslu.

Cílem diplomové práce bylo provedení návrhu rozměrů svarového spoje, vyhodnocení výsledků svarového spoje z materiálu 08Ch18N10T při použití navržené technologie svařování. A nakonec zpracování protokolu WPQR a WPS.

1 Studium svařitelnosti materiálu 08Ch18N10T pro jadernou energetiku.

1.1 Vysokolegované korozivzdorné oceli

Vysokolegované oceli obsahují více než 10 hm. % celkového obsahu legur. Podle TNI CEN ISO/TR 15608 jsou tyto oceli řazeny do skupiny 8 až 10 [2].

Důvody výroby vysokolegovaných ocelí:

- zlepšení korozních vlastností,
- zlepšení žárupevných vlastností,
- zlepšení žáruvzdorných vlastností,
- zvýšení odolnosti proti opotřebení,
- zlepšení vlastností za nízkých teplot.

Korozivzdorné oceli se vyznačují schopností pasivace a odolnosti proti elektrochemické korozi v oxidačním prostředí. Pasivací se rozumí schopnost obnovy ochranné vrstvy při poškození. Podmínkou pro schopnost pasivace je obsah chromu v tuhém roztoku nad 12 hm. %, v závislosti na obsahu uhlíku. Oceli, které odolávají oxidaci a chemické korozi v plynech při teplotách nad 600 °C, nazýváme žáruvzdorné. Existují i oceli žáropevné, ty se vyznačují vysokými hodnotami meze pevnosti při tečení [3].

Hlavní legující prvky můžeme rozdělit na dvě skupiny:

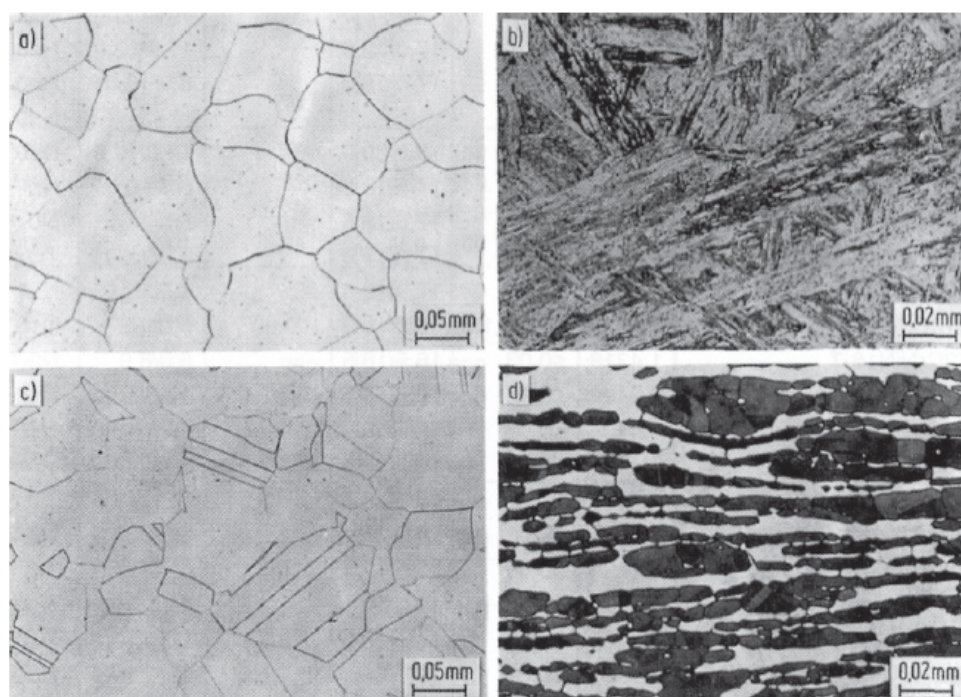
1. Austenitotvorné - v rovnovážném diagramu oblast rozšiřují γ prvky: C, Ni, Cu, Mn, N
2. Feritotvorné – v rovnovážném diagramu zužují oblast γ prvky: Cr, Mo, Si, Al, W, Ti, Nb, V

Podle mikrostruktury lze vysokolegované oceli rozdělit:

1. Feritické oceli.
2. Martenzitické oceli.
3. Austenitické oceli.
4. Austeniticko – feritické (duplexní oceli).

Tabulka 1.1 Struktury podle hlavních legujících prvků [2]

Struktura	Hlavní legující prvky
feritická	Cr
martenzitická	Cr, C nebo Ni
austenitická	Cr, Ni, Mo
austeniticko - feritická	Cr, Ni, Mo (vyšší obsah chrómu a nižší obsah Ni než u austenitických ocelí)

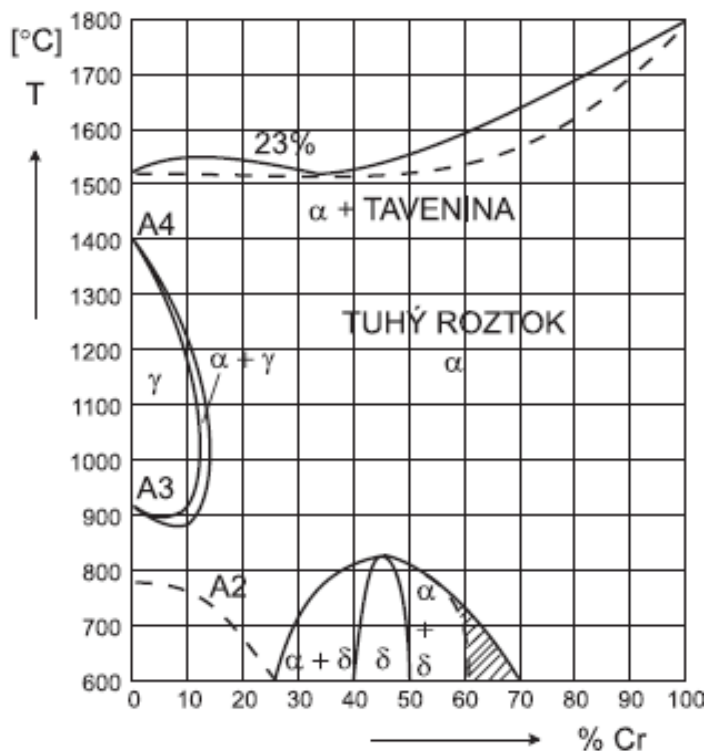


Obr. 1.1 Typy struktur ocelí [11]

- a) Feritická struktura.
- b) Martenzitická struktura.
- b) Austenitická struktura.
- d) Austeniticko – feritická struktura

1.2 Struktura vysokolegovaných ocelí

Strukturu vysokolegovaných ocelí nejvíce ovlivňuje chemické složení. Možné struktury chromových ocelí můžeme zjistit z diagramu železo – chrom (Obr. 1.2).



Obr. 1.2 Rovnovázný diagram železo – chrom [23]

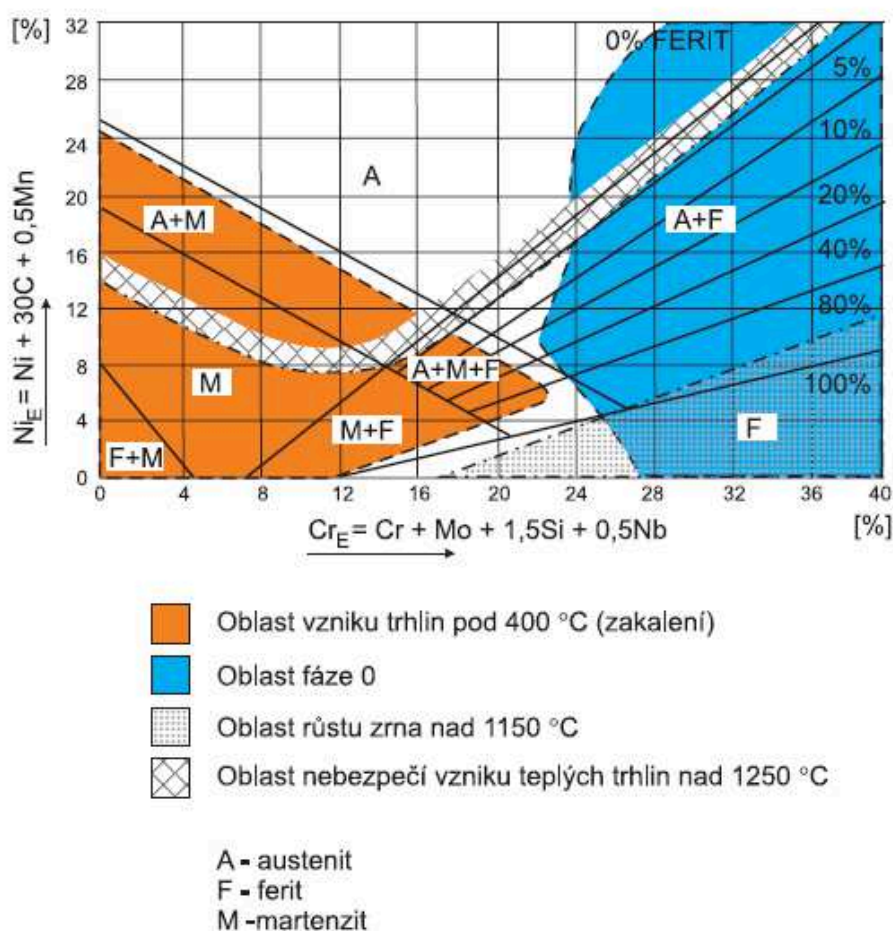
Slitina prodělává transformaci α - γ - α do obsahu chromu přibližně 13 hm. %. Nad obsahem 13 hm. % chromu je oblast feritu. U této jednofázové slitiny při ohřevu nad 900 °C hrubne zrna a slitina křehne. Zvýší-li se obsah chromu, vzniká u obsahu nad 25 hm. % nová fáze σ , která způsobuje křehnutí slitin železo - chrom. Stabilita fáze σ se vyskytuje do teploty 820 °C. Austenitické oceli krystalizují v kubické plošně středěné krystalické mřížce [1].

Chromové oceli s obsahem nad 5 hm. % Cr jsou samokalitelné. Chrom výrazně snižuje kritickou rychlost ochlazování pro vznik martenzitu. Proto i při ochlazování na vzduchu vzniká u chromových ocelí s obsahem chromu do rozsahu oblasti γ martenzitická struktura. Při obsahu chromu odpovídajícího úzké oblasti $\alpha + \gamma$ je výsledná struktura martenziticko-feritická. Při obsahu chromu nad rozsah oblasti $\alpha + \gamma$ je struktura čistě feritická [6].

Chrom - niklové oceli mají výslednou strukturu vlivem kombinace feritotvorných a austenitotvorných prvků na strukturu oceli. Vliv všech feritotvorných prvků, které ocel obsahuje, je vyjádřen ekvivalentem chromu Cr_E . Vliv austenitotvorných prvků je vyjádřen ekvivalentem niklu Ni_E . Na základě Cr_E a Ni_E byly zkonstruovány diagramy, které se používají k odhadům výsledné struktury chrom - niklových austenitických ocelí. Jedná se o Schaefflerův diagram (Obr. 1.3) a De Longův diagram (Obr. 1.4) [3].

$$Cr_E = C_r + Mo + 1,5Si + 0,5Nb \text{ [%]} \quad (1.1)$$

$$Ni_E = Ni + 0,5Mn + 30C \text{ [%]} \quad (1.2)$$



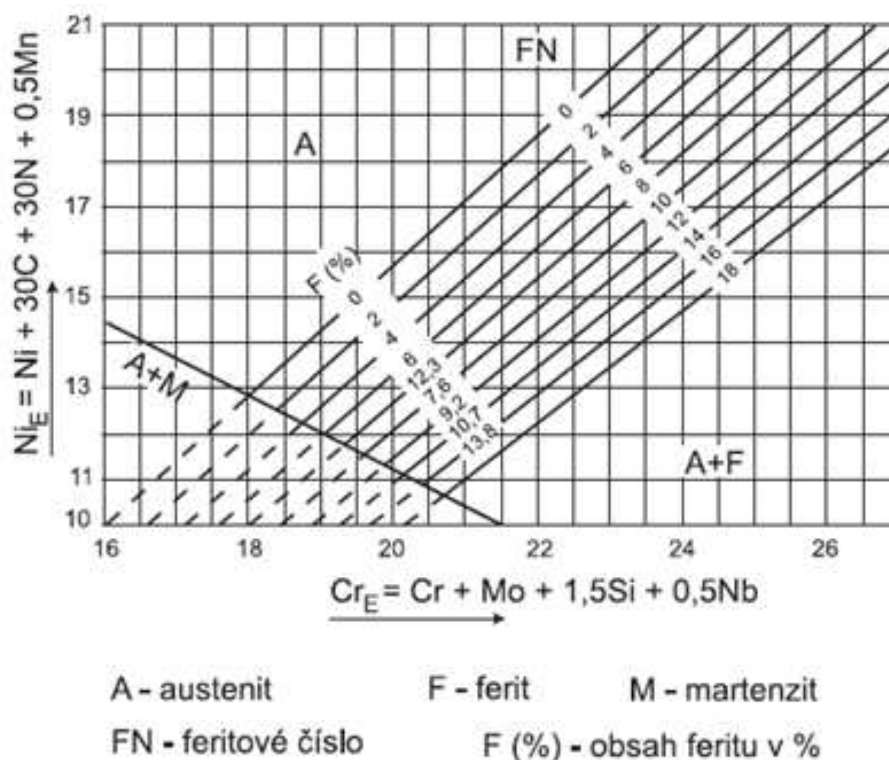
Obr. 1.3 Schaefflerův diagram [23]

Schaefflerův diagram je používán k odhadu výsledné mikrostruktury austenitických ocelí s nízkým obsahem dusíku.

Ze Schaefflerova diagramu vychází Sférianův vzorec výpočtu obsahu δ feritu v austenitické oceli [23]:

$$\delta_{ferit} = 3 \cdot (Cr_E - 0,93 \cdot Ni_E - 6,7) \text{ [%]} \quad (1.3)$$

Pro upřesnění Schaefflerova diagramu byl zkonstruován De Longův diagram (Obr. 1.4), který do Ni_E zařadil i výrazně austenitotvorný prvek dusík. S dostatečnou přesností určuje výslednou mikrostrukturu chrom – niklových austenitických ocelí s obsahem feritu 0 – 15%. Zároveň není vhodný pro oceli s vysokým obsahem manganu [22].



Obr. 1.4 De Longův diagram [1]

$$Cr_E = C_r + Mo + 1,5Si + 0,5Nb \text{ [%]} \quad (1.4)$$

$$Ni_E = Ni + 30C + 30N - 0,5Mn \text{ [%]} \quad (1.5)$$

Oceli si mohou zachovat austenitické struktury po ochlazení svarového spoje. Austenitické oceli jsou vyráběny nestabilizované a stabilizované. Nestabilizované oceli jsou doporučovány ke svařování pouze v případě, pokud mají nízký obsah uhlíku, optimálně pod 0,03%. Tyto oceli lze použít jako žárovevné materiály. Nestabilizované oceli s vyšším obsahem uhlíku se používají jako žáruvzdorné a korozivzdorné. Stabilizované oceli mohou být použity v podmínkách, kde je vyžadována žárupevnost, žáruvzdornost a korozivzdornost v podmínkách vyšších a vysokých teplot. Tyto stabilizované oceli pracují za teplot vyšších než 400°C [4].

1.3 Vliv legujících prvků na strukturu a svařitelnost ocelí

Uhlík ovlivňuje především mechanické vlastnosti. S rostoucím procentem uhlíku roste pevnostní úroveň, ale klesá plasticita materiálu. Ovlivňuje náchylnost k mezikrystalové korozi, proto je u korozivzdorných ocelí vyšší obsah nežádoucí [2].

Chrom je sice feritotvorný prvek, ale díky volné entalpii stabilizuje austenitickou matici. Díky tomu přispívá ke zlepšení korozivzdorných vlastností. Již oceli s obsahem chromu 5 až 7% jsou odolné proti oxidaci za vyšších teplot. Teprve oceli obsahující 12 až 13% chromu jsou odolné proti elektrochemické korozi v atmosféře a v různých chemických činidlech. Oceli s obsahem chromu nad 13% křehnou v důsledku změny struktury [1].

Křemík je feritotvorný prvek. Zvyšuje odolnost proti oxidaci oxidačními plyny za tepla. Při koncentraci 3 až 4% odstraňuje náchylnost k mezikrystalové korozi. Způsobuje praskání svaru a hlavně náchylnost k trhlinám za tepla [4].

Molybden je feritotvorný prvek, proto je po jeho přísadě nutné zvýšit obsah austenitických prvků pro zachování struktury. Zvyšuje odolnost proti bodové a štěrbinové korozi, zvyšuje žárupevnost a podporuje vylučování intermediálních fází. Zvyšuje tažnost austenitu za vyšších teplot a tím snižuje možnost tvorby trhlin za tepla [21].

Nikl je austenitotvorný prvek stabilizující austenitickou matici. Zvyšuje prokalitelnost oceli tím, že snižuje kritickou rychlost ochlazování [1].

Mangan je austenitotvorný prvek, kdy při koncentraci nad 3% snižuje sklon k praskání svarů. Za vyšších teplot již nerozšiřuje oblast austenitu jako např. nikl. Mangan lze nahradit dražším niklem. Přísada manganu pomáhá k rozpustnosti dusíku [4].

Dusík je silně austenitotvorný prvek. Do 0,2 hm. % zpevňuje austenitickou matici bez nežádoucích vlivů na mezikrystalovou korozi. Zvyšuje pevnostní hodnoty, působí příznivě na zjemnění zrna, zvyšuje odolnost proti bodové a štěrbinové korozi [2].

Měď je slabě austenitotvorný prvek, který nemá velký vliv na strukturu. Přidává se jen pro zlepšení korozní odolnosti proti některým kyselinám [4].

Titan a niob jsou karbidotvorné prvky, vytváří karbidy a snižují obsah uhlíku. Stabilizují oceli. Mají vliv na zjemnění zrna feritických ocelí [1].

Hliník zvyšuje žáruvzdornost a s niklem tvoří intermediální fázi. Přispívá k precipitačnímu vytvrzování [3].

Síra, selen, fosfor a olovo zvyšují obrobitelnost, ale snižují odolnost proti korozi [4].

1.4 Svařitelnost oceli

Svařitelnost je vlastnost materiálu. Je hodnocena jako způsobilost materiálu, která umožňuje vytvořit za jistých podmínek svarový spoj požadovaných vlastností. Závisí především na materiálových vlastnostech, které jsou dány chemickým složením a metalurgií výroby oceli. Dále nesmíme zapomenout na podmínky konstrukčního řešení, volbu svarových spojů a na technologii svařování. Svařitelnost ocelí vyjadřuje důsledek tepelného a deformačního ovlivnění materiálu v oblasti spoje procesem svařování [1].

Při hodnocení svařitelnosti je nutno brát v úvahu vzájemnou vazbu mezi základními materiály, technologií svařování a konstrukčním provedením spoje, určujícím tuhost svarového spoje. Pro stanovení svařitelnosti je nutno vhodně zvolit skupinu zkoušek, které stanoví vlastnosti svarového spoje podle určitých ukazatelů svařitelnosti. Ukazatele kvality svarového spoje jsou jeho mechanické vlastnosti a celistvosti svarového spoje. Pro spolehlivý provoz svarového spoje je nutno znát provozní podmínky, ve kterých bude spoj umístěn a způsob namáhání svarového spoje [3].

Technologický proces je charakterizován možností vytvořit svarový spoj žádaných vlastností. Technologie výroby ovlivňuje nejen mechanické a fyzikální vlastnosti, ale také výši vnitřních tahových napětí po samotném svařování. Technologický proces je určován způsobem svařování, svařovanými materiály, přídavnými materiály, tepelným příkonem, postupem svařování, předehřevem, ohřevem, mezioperační teplotou a tepelným zpracováním po svařování [2].

1.5 Svařitelnost austenitické oceli

Austenitické oceli mají přibližně o 50% větší tepelnou roztažnost a asi o 30% nižší tepelnou vodivost než oceli feritické struktury. Tyhle vlastnosti se při svařování projevují vznikem větších deformací a napětí než u ocelí feritických. Pro vytvoření austenitické

struktury obsahují minimálně 16,5 hm. % Cr s množstvím Ni nebo Mn, C a N. Po zlepšení svých korozivzdorných vlastností mohou být dolegovány prvky Mo, Ti, Nb, Cu, Si [1].

Svařitelnost austenitických korozivzdorných ocelí ovlivňují tři hlavní faktory:

a) Náchylnost k tvorbě teplých trhlin.

Vznik teplých trhlin ovlivňují prvky jako S, P, Si, Ti, Nb. Tyto prvky snižují plasticitu tuhnutí kovu, nebo se železem a niklem vytvářejí nízkotavitelná eutektika, která snižují technologickou pevnost hranic zrn. Teplé krystalizační trhliny vznikají pouze ve svarovém kovu.

Z důvodu nežádoucího vzniku teplých trhlin je nutné eliminovat výše uvedené prvky. Obsah síry snižujeme přechodem do strusky v podobě MnS, který vzniká vazbou na mangan. Vliv fosforu je možné snížit rozpustností v δ -feritu. Obsah křemíku omezujeme na maximální hodnotu 0,5 hm. % [3].

Rozhodujícím faktorem pro náchylnost austenitických ocelí k tvorbě teplých trhlin je obsah δ -feritu ve struktuře. Při teplotě okolí se ve svarovém kovu vyžaduje obsah δ -feritu 3FN až 15FN. Obsah δ -feritu se zvyšující teplotou narůstá [20].

Podle níže uvedených rovnic (1.6) a (1.7) lze matematickým výpočtem zjistit náchylnost korozivzdorných ocelí ke vzniku teplých trhlin. Je-li $L > 0$ a $\Delta H < 100$ je ocel náchylná ke vzniku teplých trhlin [3].

$$L = 299 \cdot C + 8 \cdot Ni + 142 \cdot Nb - 5,5 \cdot \delta^2 - 105 \quad (1.6)$$

$$\Delta H = -700 \cdot C + 17 \cdot Cr - 37 \cdot Ni - 117 \cdot Nb + 29 \cdot Mo + 188 \quad (1.7)$$



Obr. 1.5 Příklad krystalizační trhliny [10]

Možnost vzniku teplotních trhlin je možno redukovat [3]:

- snížením tepelného příkonu svařování,
- použitím přídavných materiálů vysoké čistoty a zvýšeným obsahem Mn,
- omezit deformace a napětí použitím vhodných technik svařování, tvaru svarového spoje, předehřevu,
- nepoužívat housenky s velkým tvarovým koeficientem svaru a malým průřezem,
- snížit teplotu interpass na max. 150 °C,
- snížit tuhost upnutí spoje.

b) Mezikrystalová koroze.

Může nastat v pásmu zcitlivění, které leží v pásmu teplot 425 až 815°C. Vliv uhlíku na vznik mezikrystalové koroze se projevuje od 0,03% jeho obsahu. Teorie na vznik mezikrystalové koroze jsou [5]:

Teorie ochuzení - difuze uhlíku a dusíku k hranicím zrn probíhá mnohem rychleji než difuze chromu. Poklesem obsahu chromu v povrchové vrstvě na hranicích zrn přestává být tato vrstva schopná pasivace a podléhá rychlé korozi. Mezikrystalová koroze vzniká v prostorech ochuzených o chrom, kde jeho obsah klesl pod 12 hm. % [1].

Teorie pnutí – vylučování sekundární strukturní fáze oceli je doprovázeno vnitřním pnutím. Tím vznikají ve struktuře oceli energetické rozdíly, které se projevují nedostatečnou pasivací hranic zrn [2].

Teorie článků - ušlechtilější karbidy působí jako katoda a okolní méně ušlechtilý kov jako anoda. Na hranici karbidu a základního kovu se předpokládá článek, v němž okolí karbidů značně koroduje, a to i tehdy, je-li ocel podrobena rozpouštěcímu žíhání [1].

Všechny teorie pracují s precipitací karbidu a nitridu chromu jako s hlavní příčinou vzniku mezikrystalové koroze.

c) Vznik σ -fáze

Fáze sigma je tvrdá a křehká intermetalická sloučenina, která vzniká v rozmezí teplot 500 až 820 °C u austenitických ocelí s obsahem Cr nad 25 hm. %. Na vznik této fáze jsou náchylné oceli se zvýšeným obsahem Cr. Důvodem vzniku fáze sigma může být i příliš vysoký obsah delta feritu v austenitické struktuře [3].

Přídavné materiály pro svařování austenitických ocelí se volí podle stejného nebo podobného chemického složení. Je potřeba zajistit dokonalou ochranu svarového kovu před okolní atmosférou.

Austenitické oceli se svařují bez přehřevu. Limitujeme množství vneseného tepla a hlídáme, aby teplota interpass nepřesáhla hodnotu 150 °C.

Po svařovacím procesu většinou není nutné předepisovat další tepelné zpracování.

1.6 Mezihousenková teplota

Množství tepla limitujeme mezihousenkovou teplotou (teplota interpass) tak, aby nepřesáhla zpravidla 150°C. Tepelná vodivost austenitických korozivzdorných ocelí je o něco nižší než u nízkoalokovaných a uhlíkových ocelí. To znamená, že trvá o něco déle, než dosáhneme požadované mezihousenkové teploty. Ochlazování může být také urychleno přerušením svařování nebo uváženou volbou správného postupu svařování (kladení housenek). Teplotu interpass je nutno pravidelně měřit a nesmí se překročit. Pokud je vyšší než požadovaná, musíme pozastavit svařovací proces [23].

1.7 Vnesené teplo

U austenitických korozivzdorných materiálů je nutno limitovat vnesené teplo. Tepelná vodivost chrom-niklových ocelí je nízká. Proto teplo vnesené při svařování přechází do materiálu pomalu. Důležité je udržet množství vneseného tepla na co nejnižší úrovni. V případě příliš vysokého vneseného tepla dochází k precipitaci intermetalických fází, k čemuž je náchylný hlavně ferit. U austenitických materiálů by neměla být překročena hodnota 1,5 kJ/mm [4].

Vzorec pro výpočet vneseného tepla [3]:

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v \cdot 1000} \quad [kJ \cdot mm^{-1}] \quad (1.8)$$

k ... koeficient tepelné účinnosti metody

Tabulka 1.2 Koeficient tepelné účinnosti metod svařování [3]

Číslo metody	Hodnota koeficientu k
111	0,8
121	1,0
131	0,8

1.8 Technologie svařování používané v jaderné energetice

Pro svařování kovů pro jadernou energetiku na území Slovenské republiky jsou závazné platné bezpečnostní návody a směrnice (BNS) vydané úřadem pro jadernou bezpečnost.

Svařování a navařování součástí pro výrobu a montáž strojně-technologických komponentů vybraných zařízení pro jaderné zařízení se musí vykonávat podle WPS. WPS musí být vyhotovena a schválena v souladu s ČSN EN ISO 15614-1 a přepisy BNS.

K výrobě komponentů pro zařízení jaderné elektrárny se povoluje použití těchto metod svařování [16]:

- Ruční svařování obalenou elektrodou (111),
- svařování pod tavidlem drátovou elektrodou (121),
- svařování pod tavidlem páskovou elektrodou (122),
- svařování tavící se elektrodou v inertním plynu (131),
- svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu (135),
- svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (141),
- plazmové svařování (15),
- laserové svařování (51),
- elektronové svařování (511).

V případě použití jiných metod svařování je nutné provádět atestační zkoušky.

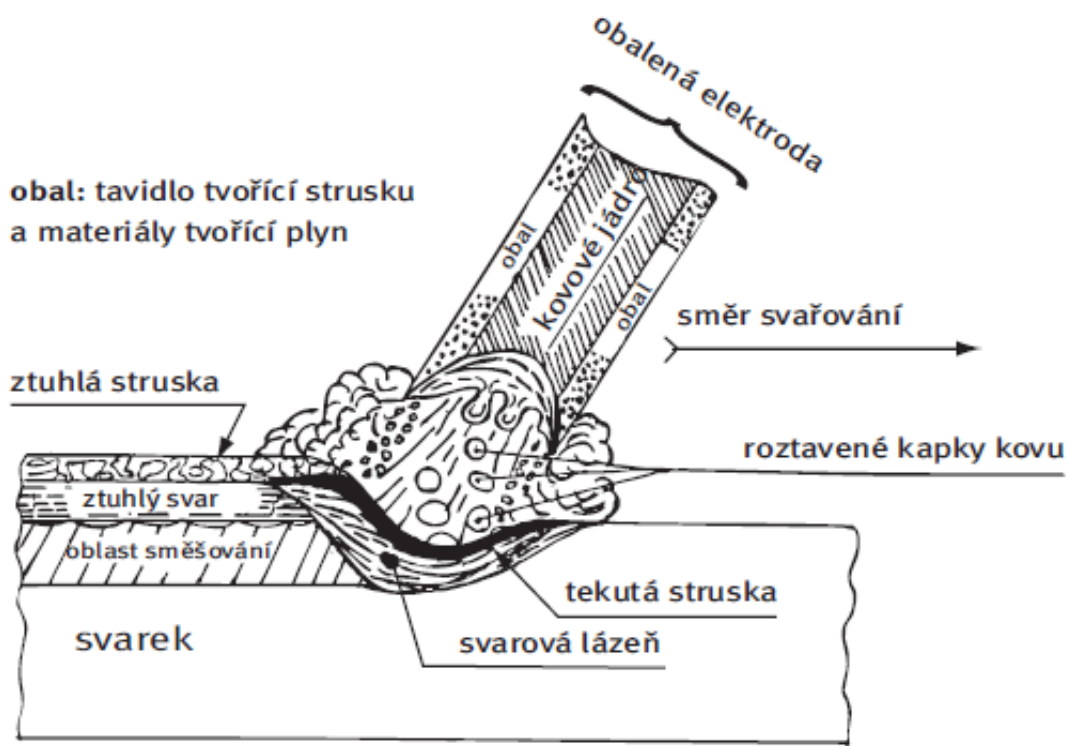
1.8.1 Ruční obloukové svařování tavící se elektrodou (111)

Základní metoda svařování, která se stále hodně využívá z důvodu její velké flexibility a jednoduchosti používání. Elektrický oblouk vzniká mezi koncem elektrody a svařovaným povrchem. Roztavené kapky kovu se přenášejí do svarové lázně. Svarový kov je chráněn struskou, která vzniká roztavením obalu elektrody. Struska vyplave na povrch a chrání svarový kov před atmosférou [8].

Nejčastěji používané obalené elektrody [7]:

Rutilové mají malý rozstřík a svary jsou s hladkým povrchem. Hlavní složkou je rutil.

Bazické mají jako hlavní složku vápenec, vhodně ovlivňuje metalurgické vlastnosti a stabilizuje oblouk. Bazické elektrody více vážou vlhkost.

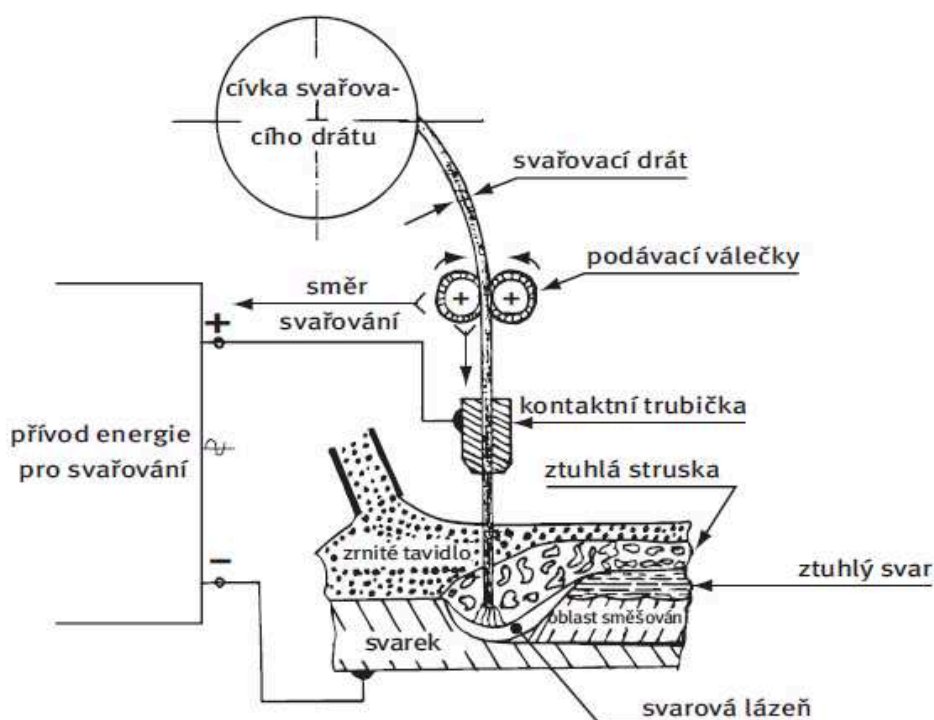


Obr. 1.6 Princip ručního obloukového svařování [12]

1.8.2 Svařování automatem pod tavidlem drátovou elektrodou (121)

Svařování pod tavidlem patří mezi velmi produktivní a pokrokové technologie svařování elektrickým obloukem. Elektrický oblouk hoří mezi elektrodou a základním materiálem pod vrstvou tavidla. U této metody dochází k odtavení velkého množství kovu. Používá se především pro větší svařované tloušťky a dlouhé nepřerušované svary. Je také jednou z nejrozšířenějších metod pro mechanizovaný způsob svařování. Používá se na velmi namáhané svarové spoje [7].

Hořením elektrického oblouku mezi základním materiálem a elektrodou natavuje elektrodu i základní materiál. Během procesu svařování je do místa svaru přiváděno tavidlo a svařovací drát. Svařovací drát je plynule posouván do místa hoření pomocí podávacího zařízení. Svařovací proces se uskutečňuje pod vrstvou tavidla. Svarový kov vyplňuje část prostoru pod tavidlem. Roztavené tavidlo ihned po vytvoření svaru chladne a vytváří sklovitou ochrannou vrstvu, která svar chrání při chladnutí [8].



Obr. 1.7 Princip svařování automatem pod tavidlem [12]

Výhody:

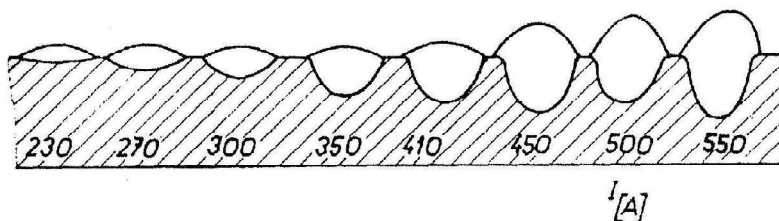
- Vysoká produktivita,
- velký průvar základního materiálu,
- vysoká tepelná účinnost,
- velká proudová hustota i při tenkých drátech,
- zvýšená kvalita svaru.

Nevýhody:

- Obtížná kontrola svaru během svařovacího procesu,
- zvýšené nároky na přípravu svarových ploch,
- omezená možnost svařování v polohách (jen PA a PB).

Vliv svařovacího proudu

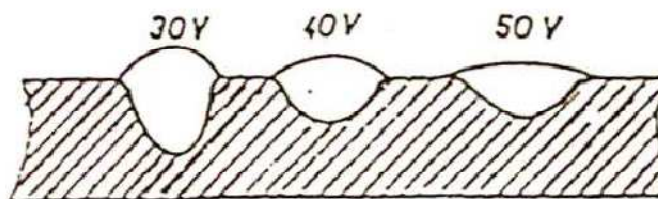
Intenzita proudu má vliv na množství nataveného kovu. Růstem intenzity proudu při zachování ostatních podmínek se zvyšuje proudová hustota a roste hodnota tepla v kuželu elektrického oblouku. Tím vzniká větší průvar do základního materiálu. Zvyšování intenzity proudu má vliv na tavení přídavného materiálu a dochází k většímu převýšení svarového kovu. Šířka je neměnná [7].



Obr. 1.8 Vliv svařovacího proudu [1]

Vliv svařovacího napětí

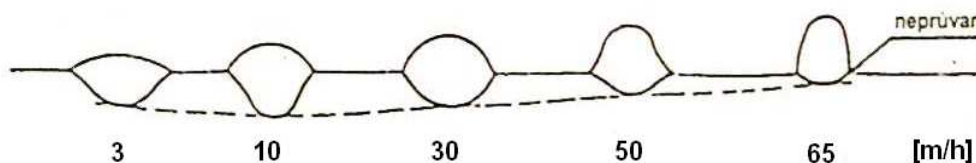
Zvýšením hodnoty svařovacího napětí vzniká větší obloukový sloupec. Tím dochází k přenosu tepla na větší plochu svařovaného materiálu. To má za následek zvětšení šířky a zmenšení průvaru svarové housenky.



Obr. 1.9 Vliv svařovacího napětí [6]

Vliv rychlosti svařování

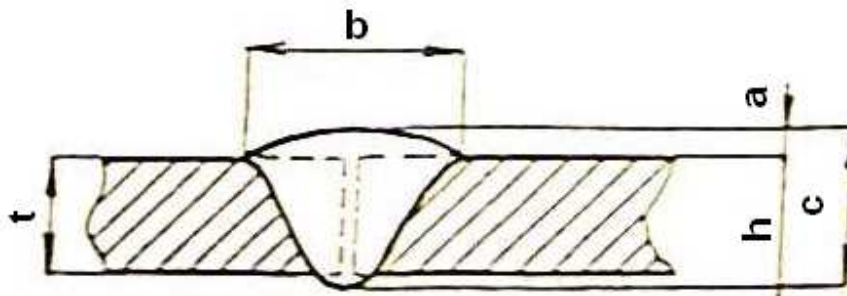
Rychlost svařování ovlivňuje dobu působení elektrického oblouku na svarový kov. Při rychlostech kolem m/hod hoří oblouk kolmo a velikost průvaru je největší. Zvyšování rychlosti způsobuje snižování průvaru. Teplo vnesené do svaru nestačí natavovat svarové plochy [21].



Obr. 1.10 Vliv Rychlosti svařování [21]

Formování svaru

Formu svaru charakterizuje hloubka průvaru do základního materiálu, převýšení, šířka svaru, celková tloušťka svaru a součinitel formy ψ .



Obr. 1.11 Charakteristické rozměry svaru [1]

$$\psi = \frac{b}{c} \quad (1.9)$$

kde: b ...šířka svaru [mm]

c ...celková tloušťka svaru [mm]

$$c = h + a \quad (1.10)$$

kde: a ...převýšení [mm]

h ...hloubka průvaru do základního materiálu [mm]

Přídavné materiály

Přídavným materiálem u metody svařování pod tavidlem jsou tavidlo a svařovací drát.

Tavidla

Hlavním účelem tavidel je zajistit stabilní hoření oblouku, rafinaci, desoxidaci a metalurgické procesy. Tavidlo musí zabránit vzniku vad na svarové housence. Velmi důležité je udržování optimální vrstvy během celého procesu svařování. Je-li velká vrstva tavidla, vzniká hrubý povrch vlivem tíhy tavidlo. Je-li však vrstva příliš tenká, neochrání dostatečně svarový kov [13].

Svařovací drát

Svařovací drát významně ovlivňuje chemické vlastnosti svarového kovu. Vyrábí se ve formě drátu, trubiček a pásek. Drát je tažený za studena, má vysoký lesk a někdy bývá potažen měděnou vrstvou jako ochrana proti korozi. Trubičkové dráty jsou tvořeny práškem z legur, který je obalen pláštěm z měkké oceli. Nevýhodou plněných drátů je zvýšený propal legujících prvků [7].

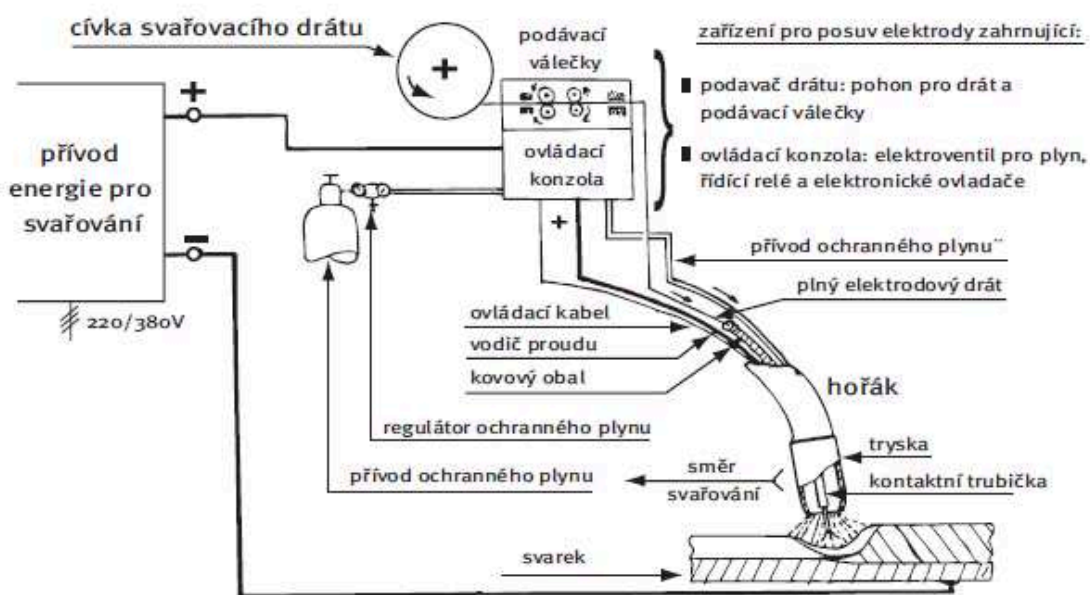
1.8.3 Svařování tavící se elektrodou v inertním plynu (131)

Můžeme se setkat s označením MIG (Metal Inert Gas). Elektrický oblouk hoří mezi odtavující se elektrodou a svařencem v ochranné atmosféře plynu. Jako ochranný plyn se používá čistý argon, nebo argon s minimem kyslíku. Přídavný materiál, který označujeme jako tzv. drátovou elektrodu, je do místa svařování přiváděn motorizovaným pohonem. Svařování je možné ve všech svařovacích polohách. Výhodou je vysoká svařovací rychlost, oblouk i svarová lázeň je jasně viditelná, menší deformace při svařování ve zkratovém přenosu [8].

Korozivzdorné oceli jsou vždy svařovány způsobem, kdy je kladný pól stejnosměrného proudu přiveden na elektrodu. Rozlišujeme tři druhy mechanismu přenosu kovu [7]:

- Zkratový přenos, kdy je kov roztaven do velké kapky. Při dotyku kapky se svarovou lázní nastane zkrat a kapka se oddělí.
- Kapkový přenos. Nastává tavení drátu do velkých kapek, které při překonání povrchového napětí volně padají do svarové lázně.

- Sprchový přenos je dán vysokou proudovou hustotou. Elektroda se taví a vznikají jemné kapky. S rostoucí proudovou hustotou se hrot elektrody mění v kužel a vznikají ještě jemnější kapky.



Obr. 1.12 Princip svařování tavící se elektrodou v inertním plynu [12]

1.9 Příprava svarových ploch

Čistota povrchu svarového spoje je závislá na technologii a použitých parametrech svařování. Čistota povrchu svaru značně ovlivňuje korozní odolnost svařence. Pokud není docíleno povrchové čistoty předepsané v požadavcích, je nutno svarový spoj upravit. Čištění po svařování může být provedeno několika metodami [20]:

Kartáčování - Tento způsob by neměl být používán pro odstranění ulpívajících nečistot. Nutno použít speciálního drátěného kartáče s drátky z korozivzdorné oceli nebo srovnatelného materiálu.

Broušení – Vhodné pro odstranění hrubých povrchových nečistot, pro dosažení hladkého přechodu mezi svarem a základním materiálem. Nutno použít speciální brusné kotouče, disky nebo pásy bez přítomnosti železa. Nedoporučuje se nadměrné broušení, aby nedošlo ke ztenčení základního materiálu.

Tryskání – Pro odstranění ulpívajících nečistot. Na povrchu se vytváří tlaková napětí. Doporučenými tryskacími médii jsou sklo a broky z korozivzdorné oceli. Médium nesmí být znečištěno uhlíkovou ocelí.

Moření – Chemický způsob odstraňování oxidů na povrchu. Použitá kyselina závisí na typu oceli, teplotě moření a době moření. Po ukončení této technologie je nutné provést pečlivé odstranění všech produktů moření z povrchu.

Elektrolytické leštění - Používá se u nestabilizovaných korozivzdorných ocelí pro dosažení hladkého povrchu a optimální korozní odolnosti.

2 Korozní odolnost austenitických ocelí

Nerezavějící oceli vykazují v porovnání s nelegovanými a s nízkolegovanými oceli výrazně lepší odolnost proti korozi. Jsou odolné proti celé řadě agresivních médií a nepotřebují žádnou další úpravu povrchu proti korozi. Při mechanickém poškození pasivní vrstvy se vrstva samovolně obnovuje. Odolnost nerezavějících ocelí proti korozi je závislá hlavně na chemickém složení oceli, dále na kvalitě povrchu a struktuře. Proto je pro korozní odolnost velmi důležitá správná volba druhu oceli se správným tepelným zpracováním a se správným opracováním povrchu. Tepelně ovlivněná oblast a svarový kov představují strukturní a často i chemickou nehomogenitu spoje, která může výrazně snížit korozní odolnost [5].

Rovnoměrná plošná koroze

Rovnoměrná plošná koroze se vyznačuje stejnoměrnou, nebo přibližně stejnoměrnou oxidací oceli po celém povrchu. Za vyhovující odolnost proti plošné korozi se považuje úbytek pod 0,1 mm ročně. K rovnoměrné plošné korozi může u korozivzdorných ocelí docházet jen v kyselinách a v silných loužích. Oceli s vyšším obsahem chromu jsou odolnější. Vyšší odolnosti proti plošné korozi dosahují chrom-niklové oceli. Je určována v podstatě chemickým složením. Další cestou ke zvýšení odolnosti proti plošné korozi je možnost dolegování molybdenem [11].

Bodová koroze (Pitting)

K bodové korozi může docházet v případech, kdy se místně poruší pasivní vrstva, nebo v místech se slabšími ochrannými vlastnostmi pasivní vrstvy. Jde o děj, při kterém vznikají na povrchu hluboké důlky (často jen o velikosti vpichu jehly), ale okolní povrch zůstává bez pozorovatelného napadení. Koroze vzniká za přítomnosti chloridových iontů, a to především při zvýšených teplotách. Usazeniny, cizorodá rez, zbytky strusky a náběhové barvy na povrchu nebezpečí důlkové koroze zvyšují.

Zvyšováním obsahu chromu, především však přidáváním molybdenu a částečně i dusíku se odolnost nerezavějících ocelí proti důlkové korozi zvyšuje [9].



Obr. 2.1 Příklad bodové koroze [9]

Štěrbínová koroze

Štěrbínová koroze je založena na stejném principu jako koroze bodová. Ústí štěrbin bývá velmi malé (pod $10\mu\text{m}$). Proto se jedná o druh korozního napadení, které vzniká v místech, kde je malé množství elektrolytu odděleno uvnitř štěrbin a nemůže komunikovat s velkým objemem elektrolytu vně štěrbin. Následky štěrbin se projevují i v trhlinách a necelistvostech kovu, které ústí na povrchu, kde dochází k celé řadě dalších druhů koroze, jako je korozní praskání, korozní únava, mezikrystalová a bodová koroze [5].

K štěrbinové korozi dochází v případě konstrukčních štěrbin, v závitových spojích, v pórech svarů, u lemových a nýtovaných spojů, pod těsníci plochami u spojů (*Obr 2.2*), pod korozními produkty, nebo pod povlaky, které ztratily adhezi ke kovu [10].



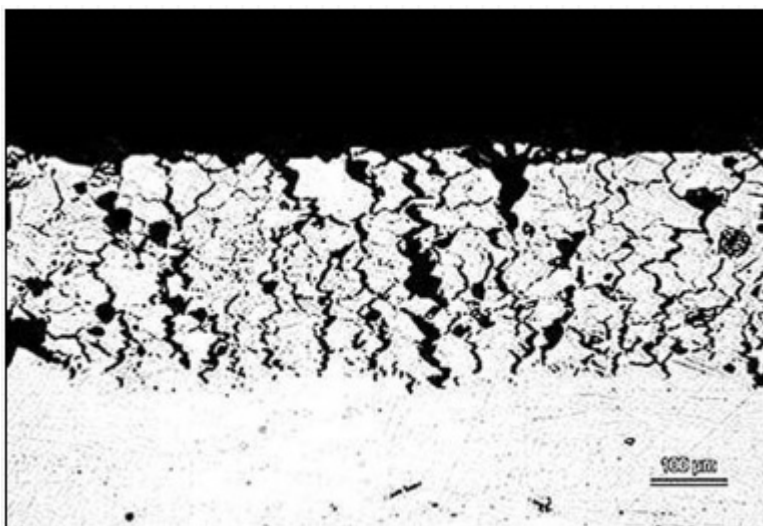
Obr. 2.2 Ukázka štěrbinové koroze na těsnící ploše [10]

Mezikrystalová koroze

Vzniká nerovnoměrně v místech se sníženým obsahem chromu v blízkosti hranic zrn. K mezikrystalické korozi může docházet, když se působením tepla (mezi 450 a 850 °C u austenitických ocelí) na hranicích zrn vylučují karbidy chromu. Takové působení tepla nastává při procesu svařování v blízkosti svarového spoje. To způsobuje místní ochuzování o chrom v okolí vyloučených karbidů chromu [5].

Snížením obsahu uhlíku, nebo jeho vazbou na titan případně niob můžeme snížit riziko vzniku mezikrystalové koroze. Kovový materiál korodující mezikrystalově ztrácí mechanickou pevnost, bez jakékoliv pozorovatelné vzhledové změny. Je to dáno tím, že za určitých podmínek přednostně koroduje materiál v úzkém pásmu na hranici zrn, která pak vzájemně ztrácí soudržnost [22].

V případě požadavku na zvýšení odolnosti proti mezikrystalové korozi svařenců se provádí rozpouštěcí žíhání (teplota okolo 1050–1100 °C). Dochází k opětovnému rozpuštění vyloučených karbidů v austenitu a následuje rychlé ochlazení svaru. Nebo se provede stabilizační žíhání (u stabilizovaných typů austenitických ocelí dojde při teplotách okolo 800–850 °C k urychlení vzniku karbidů stabilizačních prvků TiC, NbC nebo TaC) [10].



Obr. 2.3 Mezikrystalová koroze [10]

3 Volba vhodné technologie svařování

Na výrobu strojně-technologických komponentů zařízení jaderných elektráren typu VVER 440 jsou určeny pouze materiály, které jsou předepsány v původní technické dokumentaci. Materiály jsou značeny a vázány na normy GOST. Jedním z těchto materiálů je korozivzdorná austenitická ocel 08Ch18N10T.

3.1 Austenitická ocel 08Ch18N10T

Jedná se o materiál zařazený do skupiny 8.1 podle TNI CEN ISO/TR 15608, což jsou austenitické korozivzdorné oceli s obsahem chromu ≤ 19 hm. %. Tato korozivzdorná austenitická ocel byla schválena BNS II.3.3/2011 jako vhodná k použití pro výrobu strojně-technologických komponentů VZJZ.

Tabulka 3.1 Značení oceli [17]

Číslo materiálu	EU	GOST	ASTM/AISI
1.4541	X6CrNiTi18-10	08Ch18N10T	321

Tabulka 3.2 Chemické složení [17]

Prvek	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Ti	N
hm. %	$\leq 0,08$	$\leq 2,0$	≤ 1	$\leq 0,045$	$\leq 0,03$	9 - 12	17 - 19	$\leq 0,7$	$\leq 0,1$

Tabulka 3.3 Mechanické vlastnosti [17]

R_m [MPa]	500 – 700
$R_{p0,2}$ [MPa]	min. 190
Tažnost A [%]	min. 40
Nárazová práce při +20°C [J]	min. 100
Tvrdost HB	max. 215

3.2 Technologie svařování

Po přihlédnutí k možnostem a vybavení firmy Armatury Group a.s. Dolní Benešov přicházely v úvahu metody 111, 131 a 121. Vzhledem ke tvaru svarového spoje, možnosti automatizace a dlouhodobým zkušenostem byla vybrána metoda svařování automatem pod tavidlem.

Parametry vhodné svařování automatem pod tavidlem:

Polohy svařování:	pouze PA nebo PB (sklon cca 7°)
Druhy základního materiálu:	nelegované, nízkolegované, vysokolegované oceli, Ni, Cu, Al
Tloušťka základního materiálu:	3 až 100 mm
Svařovací proud:	200 až 2000 A
Napětí na oblouku:	20 až 50 V
Druh svařovacího proudu:	stejnosměrný, střídavý
Svařovací rychlost:	15 až 120 m/h
Průměr přídatného materiálu:	2,0 až 8,0 mm
Minimální ekonomická délka svaru:	1000 mm

3.3 Svařovací materiály

U austenitických korozivzdorných ocelí se svařovací materiál volí podle chemického složení základního materiálu. Pro svařování austenitických ocelí jsou přídatné materiály dolegovány vysokým obsahem niklu a vysokým obsah chromu z důvodu zachování austenitické struktury ve svarovém kovu.

Pro výrobu zařízení pracujících v JE MO se musíme řídit platným předpisem BNS II.5.3/2011. Tento předpis nám určuje použití atestovaných svařovacích materiálů, které jsou v něm uvedeny. Jelikož svařovací materiály z dob zhotovení technicko-výrobní dokumentaci se už dnes nevyrábí, slouží materiály v předpise jen jako referenční. K těmto referenčním materiálům bylo potřeba atestovat nové svařovací materiály ekvivalentních vlastností.

V tabulce 3.4 je srovnání chemického složení referenčního drátu Sv-04Ch19N11M3 a tavidla OF-6 s dnes dostupným a atestovaným svařovacím drátem EAS 4 M-UP

v kombinaci s tavidly BB 202 a BB 203. V tabulce 3.5 je uvedeno srovnání mechanických vlastností.

Byl vybrán svařovací drát EAS 4M-UP o průměru 2,0 mm s tavidlem BB 202 firmy Böhler. Drát je vyráběn o průměrech 1,6; 2,0 a 2,4 mm. Přesné parametry svařovacího materiálu jsou v příloze A.

Tabulka 3.4 Chemické složení [14, 15]

	Sv-04Ch19N11M3 + OF-6	EAS 4 M-UP + BB 202	EAS 4 M-UP + BB 203
C	≤ 0,08	≤ 0,03	≤ 0,03
Si	0,30 – 1,20	≤ 1,0	≤ 1,0
Mn	0,80 – 2,00	1,00 – 2,50	1,00 – 2,50
P	≤ 0,03	≤ 0,025	≤ 0,025
S	≤ 0,02	≤ 0,025	≤ 0,025
Cr	16,00 – 20,00	17,80 – 20,00	18,00 – 20,00
Ni	9,00 – 12,00	11,00 – 14,00	11,00 – 14,00
Mo	1,50 – 3,00	2,00 – 3,00	2,00 – 3,00
Co	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05

Tabulka 3.5 Mechanické vlastnosti [14, 15]

	Sv-04Ch19N11M3 + OF-6		EAS 4 M-UP + BB 202		EAS 4 M-UP + BB 203	
T _s	+ 20°C	+ 350°C	+ 20°C	+ 350°C	+ 20°C	+ 350°C
R _{p0,2} [MPa]	≥ 274	≥ 245	≥ 320	≥ 245	≥ 320	≥ 245
R _m [MPa]	≥ 441	≥ 392	510 - 740	≥ 392	510 -	≥ 392
A ₅ [%]	≥ 25		≥ 30	≥ 18	≥ 30	≥ 18
Z [%]	≥ 40		≥ 40		≥ 40	
KCV (KCU) při + 20°C[J·cm ⁻²]	(49)		≥ 58		58	
Obsah δ feritu [%]	2 - 8		2 - 12		4 - 12	

3.4 Manipulace, skladování a přesušování přídavných materiálů

Tavidla by měla být skladována v originálních neporušených obalech. Mohou být balena do papírových, plastových nebo kovových obalů. Skladování v porušených obalech může znamenat nižší životnost přídavných materiálů. Neměly by být skladovány déle než 3 roky, to platí pro tavidla v kovových sudech [16].

Pro omezení negativního vlivu prostředí je doporučováno dodržovat následující skladovací podmínky:

- minimální skladovací teplota 15°C,
- relativní vlhkost vzduchu maximálně 50%.

Před použitím by měla být tavidla přesušena dle pokynů výrobce. Přesušená tavidla musí být uchována v hermeticky uzavřených nádobách nebo sušících pískách při teplotě 60 – 70°C . Výrobce doporučuje sušení v režimu 300 – 350°C po dobu 2 – 10 hodin [13].

3.5 Kvalifikace svářečského personálu

Stehování, svařování a navařování součástí strojně-technologických komponentů může vykonávat jen svářeč, který splnil následující požadavky [16]:

- 1) Vykonal zkoušky v souladu s ČSN EN 287-1 a má platný certifikát o zkoušce.
- 2) Svářeč musí mít praxi alespoň jeden rok ve svařování strojně-technologických součástí stejné skupiny ocelí, jako budou mít součásti pro strojně-technologické komponenty JE MO.

Každý svářeč, který splňuje tyto požadavky, musí mít přidělené osobní razítko, které je registrované útvarem technologie svařování a kontroly kvality.

Příklad vyhovující kvalifikace svářeče pro svarový spoj řešený v této práci:

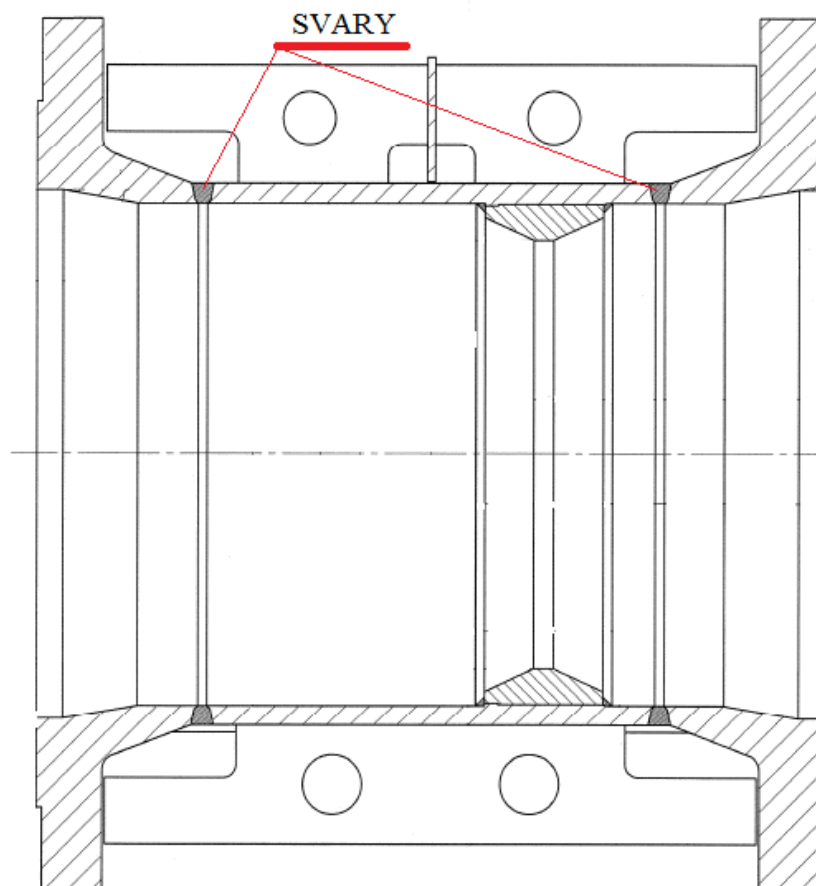
EN 1418 121 T BW 8 S t37,0 D260,0 PA ss mb ml

4 Návrh rozměrů svarového spoje.

Svarový spoj, na který se bude postup svařování ve výrobě vztahovat, musí být reprezentován zhotoveným normalizovaným zkušebním kusem nebo více kusy. Délka a počet zkušebních kusů musí být dostačující, aby bylo možné provést všechny požadované zkoušky. Pro všechny zkušební kusy musí být pro svařované trubky stejná tloušťka základního materiálu [18].

Svarový spoj na hotovém výrobku bude spojovat těleso armatury s přírubou (Obr. 4.1). Jedná se tedy o trubkový spoj. Podle výkresové dokumentace byly určeny rozměry pro zkušební vzorky. Jedná se o dvě trubky vnějšího průměru 260 mm a tloušťky stěny 48 mm. Zkušební kusy jsou opatřeny zámkem, který slouží ke správnému ustavení a zároveň plní funkci podložky. Výkres zkušebních kusů je v příloze B.

Vzhledem k rozměrům zkušebního dílce postačí jen jeden svařenec na vykonání zkoušek předepsaných ČSN EN ISO 15614-1 a PN AE G-7-010-89.



Obr. 4.1 Schéma svařované armatury



Obr. 4.2 Pohled do těla armatury

5 Provedení svarového spoje v provozních podmínkách

Příprava a svařování zkušebních dílců byly provedeny podle návrhu postupu svařování pWPS (příloha C) a za všeobecných podmínek svařování ve výrobě, které musí reprezentovat. Záznam ze svařování zkušebnímu kusu je v příloze D.

5.1 Příprava svarových ploch

Svarové plochy a povrch součásti se připravují mechanickým obráběním. V případě úpravy ploch tepelným dělením musí dojít u korozivzdorných austenitických ocelí v konečné fázi k mechanickému opracování povrchu. Tím se odstraní povrchové nerovnosti a oxidy. Při mechanickém obrábění nesmí dojít k místnímu přehřátí, které je doprovázeno zbarvením kovu [16].

5.2 Volba parametrů svařování

Svařovací parametry jsou zvoleny na základě možností svařovacího zařízení, svařitelnosti základního materiálů a doporučených svařovacích parametrů přídatného materiálu Böhler EAS 4M-UP.

Svařovací parametry jsou uvedeny v záznamu pWPS (příloha C).

Tabulka 5.1 Svařovací parametry

Průměr přídavného materiálu	Svařovací proud I [A]	Svařovací napětí U [V]	Rychlost svařování v [cm/min]	Tepelný příkon [kJ/mm]
2,0	250 - 280	28 - 30	50	max. 1,5

5.3 Stehování a dočasné technologické upínky

Stehování a přivařování dočasných upínek je možné vykonávat jen technologií 111 nebo 141. Pro stehování korozivzdorných austenitických ocelí je nutné používat přídatné materiály stejných značek, jako jsou určeny ke svařování [20].

Schválené obalené elektrody pro dostavbu JE MO:

Tabulka 5.2 Chemické složení obalených elektrod [16]:

	FOX EAS 4M	FOX CN 24/13Nb	FOX SAS 2R
C	$\leq 0,03$	$\leq 0,06$	$\leq 0,035$
Si	0,25 – 0,50	$\leq 0,80$	0,30 – 0,70
Mn	0,90 – 1,60	0,50 – 1,50	0,90 – 1,50
P	$\leq 0,025$	$\leq 0,025$	$\leq 0,025$
S	$\leq 0,015$	$\leq 0,020$	$\leq 0,015$
Cr	18,00 – 19,00	23,50 – 25,00	19,00 – 20,00
Ni	11,30 – 12,50	12,00 – 13,00	9,20 – 10,50
Mo	2,50 – 3,00	$\leq 0,30$	-
Co	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$	$\leq 0,01$

Tabulka 5.3 Mechanické vlastnosti obalených elektrod [16]:

	FOX EAS 4M		FOX CN 24/13Nb		FOX SAS 2R	
T _s	+ 20°C	+ 350°C	+ 20°C	+ 350°C	+ 20°C	+ 350°C
R _{p0,2} [MPa]	≥ 350	≥ 275	≥ 350	≥ 280	≥ 390	≥ 370
R _m [MPa]	≥ 540	≥ 445	≥ 550	≥ 400	≥ 550	≥ 510
A ₅ [%]	≥ 35	≥ 22	≥ 23	≥ 18	≥ 25	≥ 20
Z [%]	-	-	-	-	-	-
KCV (KCU) při + 20°C[J·cm ⁻²]	80		≥ 47		≥ 55	
Obsah δ feritu [%]	4 - 12		13 - 18		4 - 12	

5.4 Technologický postup svařování zkušebního svaru

1) Sestavení zkušebních dílců.

Sestavení se provede na svařovacím automatu, vzájemná poloha je zajištěna zámkem, který je na trubkách. Trubky jsou upnuty do sklíčidla na polohovadle.

2) Nastavení předepsaných parametrů.

3) Svařování trubek.

Svařovat podle pWPS. Kontrolovat mezihousenkovou teplotu. V případě jejího překročení pozastavit svařování. Svařovací parametry pravidelně zapisovat do protokolu. Svarový spoj ukončit s mírným převýšením a plynulým přechodem do základního materiálu.

4) Svar přebrousit do čistého kovu.

Na začištění svaru je nutno použít náradí určené pro nerezové materiály.

6 Vyhodnocení výsledků svarového spoje.

Kvalita svarového spoje se kontroluje nedestruktivními a destruktivními zkouškami. Rozsah zkoušek a hodnotící kritéria jsou závislá na třídě bezpečnosti zařízení a kategorii svarového spoje.

Tabulka 6.1 Rozsah zkoušek podle ČSN EN ISO 15614-1

ČSN EN ISO 15614-1	Druh zkoušky	Rozsah zkoušení
Tupý spoj (trubka-trubka) 1229	Vizuální kontrola	100%
	Ultrazvuková zkouška	100%
	Kapilární zkouška	100%
	Příčná zkouška tahem	2 vzorky
	Příčná zkouška lámavosti	4 vzorky
	Zkouška rázem v ohybu	2 sady
	Kontrola makrostruktury	1 vzorek

Doplňkové zkoušky podle PN AE G-7-010-89:

- Chemický rozbor svarového kovu.
- Zkouška mezikrystalové koroze.
- Stanovení Feritového čísla.
- Stanovení plošného obsahu δ feritu.

6.1 Výsledky nedestruktivních zkoušek

Nedestruktivní zkoušky byly provedeny na zkušebním kuse před jeho rozřezáním na zkušební vzorky. Materiály náchylné na praskání, bez tepelného zpracování po svařování a bez dohřevu, by měly vyčkat před zkoušením.

Nedestruktivní zkoušení musí být provedeno na základě ČSN EN ISO 15614-1 a BNS:

Tabulka 6.2 Předpisy nedestruktivních zkoušek

Zkouška	Prováděcí předpis	Požadavek dle předpisu
Vizuální	ČSN EN 970	ČSN EN ISO 5817, stupeň jakosti B
		BNS II.5.2/2007
Kapilární	ČSN EN 571-1	ČSN EN ISO 23277, st. 1
		BNS II.5.2/2007
Prozáření	ČSN EN 1435	ČSN EN 12517, st. 1
		BNS II.5.2/2007

Každá z nedestruktivních zkoušek byla vyhodnocována podle dvou kritérií přípustnosti.

U nedestruktivních zkoušek zkušebního kusu nebyly zjištěny žádné vady. Výsledky jsou zaznamenány v přílohách E, F, G, H.

Zkušební svarový spoj je vyhovující.

6.2 Výsledky destruktivních zkoušek

6.2.1 Zkouška tahem příčná

Příčná zkouška tahem byla provedena dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Hodnota pevnost v tahu nesmí být nižší, než minimální hodnota určená pro základní materiál [18].

Zkouška byla prováděna při teplotě okolí 20°C. Minimální požadovaná hodnota je $R_m = 485$ MPa. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 6.3, záznam o provedené zkoušce je v příloze I.

Tabulka 6.3 Výsledky příčné tahové zkoušky

Vzorek	Průřez [mm]	Max. zatížení [kN]	R_m [MPa]	Porušení	Výsledek
1511/1/T1	775,6	421,0	543	mimo svar	Vyhovuje
1511/2/T2	775,0	424,0	547	mimo svar	Vyhovuje

Svarový spoj vyhovuje.

6.2.2 Zkouška lámavosti

Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 5173, při teplotě okolí 20°C. Úhel ohybu byl 180°. Pro tloušťky menší než 12 mm musí být zkoušeny dvě zkušební tyče ze strany kořene a dvě z lícové strany.

Výsledky jsou uvedeny v tabulce 6.4 a záznam o provedené zkoušce je v příloze I.

Tabulka 6.4 Výsledky zkoušky lámavosti

Vzorek	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Výsledek
1511/1/O1	10	37,5	300	Bez trhlin
1511/1/O2	10	37,5	300	Bez trhlin
1511/1/O3	10	37,5	300	Bez trhlin
1511/1/O4	10	37,5	300	Bez trhlin

Svarový spoj vyhovuje.

6.2.3 Zkouška rázem v ohybu

Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN 875. Požadované minimum při teplotě -60°C bylo 27J. Vzorky byly opatřeny vrubem tvaru V. Pro všechna stanovená umístění musí každá sada obsahovat tři zkušební vzorky.

Výsledky jsou uvedeny v tabulce 6.5 a záznam o provedené zkoušce je v příloze I.

VHT: Charpy V-vrub, vrub v tepelně ovlivněné oblasti, vrub napříč tloušťkou

VWT: Charpy V-vrub, vrub ve svarovém kovu, vrub napříč tloušťkou

Tabulka 6.5 Výsledky zkoušky rázem v ohybu

Vzorek	Umístění	Jednotlivé hodnoty [J]			Průměr [J]
1511/1/ V1-3	VHT 2/2	83	85	99	89
1511/1/ V4-6	VWT 0/2	178	148	130	152

Svarový spoj je vyhovující.

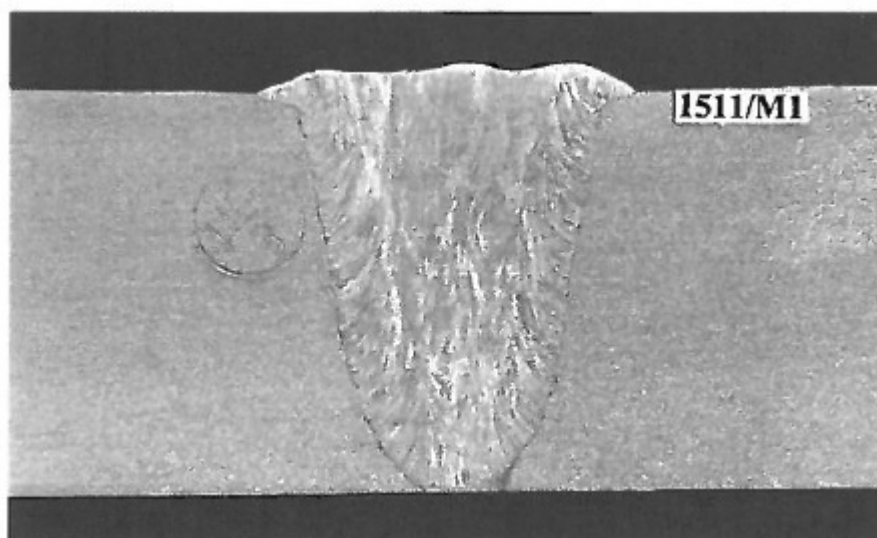
6.3 Metalografické výsledky

Protokol s vyhodnocením metalografických zkoušek se součástí příloh (příloha J).

6.3.1 Hodnocení makrostruktury

Vzorek musí být připraven a naleptán podle ČSN EN 1321 tak, aby byla jasně patrná hranice natavení, tepelně ovlivněná oblast a způsob kladení housenek [18].

Makrostruktura daných vzorků byla leptadlem dle Adler-Mattinga. Makrostruktura byla provedena na jednom vzorku. Makrostrukturu vzorku zobrazuje Obr. 6.1.



Obr. 6.1 Makrostruktura vzorku (1x)

Makrostruktura je vyhovující.

6.3.2 Hodnocení proti mezikrystalové korozi

Vzhledem k normám, na základě kterých se svařovalo, bylo vyhodnocení mezikrystalové koroze provedeno podle norem ČSN EN ISO 3651-2 a GOST 6032.

První zkoušení proběhlo na dvou zkušebních vzorcích o rozměrech 80 x 40 x 5 mm v souladu s ČSN EN ISO 3651-2 s hodnotícím postupem A. Po expozici ve zkušebním prostředí a ohybu ($D = 4t$) nebyly na zkušebních tyčích zjištěny příčné trhliny. Materiál svarového spoje je odolný proti mezikrystalové korozi.

Druhé zkoušení proběhlo na čtyřech zkušebních vzorcích o rozměrech 80 x 20 x 5 mm v souladu s GOST 6032 s hodnotící metodou AM. Po expozici ve zkušebním prostředí a ohybu ($D = 4t$) nebyly na zkušebních tyčích zjištěny příčné trhliny. Materiál svarového spoje je odolný proti mezikrystalové korozi.

Tabulka 6.6 Vyhodnocení mezikrystalové koroze

Vzorky		Rozměry [mm]	Norma	Výsledek
zkušební	kontrolní			
1511/1/K1	1511/1/K2	80 x 40 x 5	ČSN EN ISO 3651-2	Vyhovuje
1511/1/K1, 1511/1/K2	1511/1/K3, 1511/1/K4	80 x 20 x 5	GOST 6032	Vyhovuje

6.3.3 Stanovení feritového čísla

Feritové číslo FN bylo stanoveno měřením přitažlivé síly mezi svarovým kovem a permanentním magnetem přístroje FA-1M podle normy ČSN EN ISO 8249. Feritové číslo nevyjadřuje obsah feritu v procentech. Měření bylo provedeno na povrchu a v polovině tloušťky svaru. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 6.7.

Tabulka 6.7 Výsledky měření feritového čísla

Feritové číslo FN			
Vzorek	Min.	Max.	Střední hodnota
1511/1 – povrch	4,2	4,3	4,2
1511/1 – ½ tl. svaru	4,6	4,7	4,7

6.3.4 Stanovení podílu δ -feritu

Stanovení podílu δ -feritu bylo provedeno dle ASTM E562 pomocí obrazového analyzátoru LECO IA 32, při zvětšení 500x. Bylo celkem 5 polí. Plocha jednoho pole ve svarovém kovu byla 0,0230 mm². Celková plocha polí činila 0,1150 mm². Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 6.8.

Tabulka 6.8 Výsledky měření podílu δ -feritu

Vzorek 1511/D1	
pole	δ -ferit [%]
1	4,34
2	4,69
3	5,24
4	4,77
5	5,93
Celkový počet polí	5
Plocha pole (mm ²)	0,0230
Celková plocha (mm ²)	0,1150
Průměr	4,99
Max.	5,93
Min.	4,34
Směr. odchylka	0,614

6.4 Výsledky chemického složení

Zkouška chemického složení svarového kovu byla zhotovena přístrojem Spectrolab 2000. Protokol o provedené zkoušce je v příloze K. Výsledné hodnoty chemického složení jsou uvedeny v tabulce 6.9.

Tabulka 6.9 Chemické složení

Vzorek	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	No	Nb	Co
1R-1511/1	0,011	1,34	0,50	0,025	0,0162	0,11	11,9	17,9	2,53	<0,023	0,044

Všechny hodnoty v tabulce jsou v procentech.

7 Zhodnocení

Cílem diplomové práce bylo řešení problematiky svarových spojů ocelí 08Ch18N10T, používaný při dostavbě 3. a 4. bloku jaderné elektrárny Mochovce. Svarový spoj podléhá nejprísnějším požadavkům, které jsou v oblasti jaderné energetiky samozřejmostí.

Na základě teoretické části práce byla navržena vhodná technologie svařování a zvolen přídavný materiál. Problematický výběr přídavného materiálu byl způsoben dokumentací z 80. let minulého století určené ke stavbě a dostavbě jaderné elektrárny Mochovce. Přídavné materiály v této dokumentaci už se nevyrábějí, proto se postupem času musely atestovat nové materiály. Původní materiály dnes slouží jako referenční, protože veškerá technicko-výrobní dokumentace počítala s jejich mechanickými vlastnostmi. Proto bylo nutné nalézt materiály ekvivalentní.

V případě svařování příruby na těleso armatury byla zvolena technologie svařování autorem pod tavidlem (121). Svar je lehko přístupný a nic nebrání k použití metody 121. Svařovací drát a tavidlo, s vyhovujícími výsledky, bylo použito od firmy Böhler.

Atestační spoj byl podroben nedestruktivním i destruktivním zkouškám, při kterých nebyly odhaleny žádné vady. Na základě zkoušek byl vypracován protokol WPQR a následně mohl být vypracován protokol WPS (příloha L).

V současné době se výsledky diplomové práce využívají při svařování armatur dílců pro 3. a 4. blok jaderné elektrárny Mochovce.

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ivo Hlavatému, Ph.D. za čas a cenné rady. Dále pak paní Ing. Ludmile Hoňkové, společnosti Armatury Group a.s. Dolní Benešov za poskytnutí podkladů, protokolů a odborných rad z praxe.

8 Seznam použité literatury:

- [1] KUČERA, J. *Teorie svařování 2*. VŠB OSTRAVA 1991. 408s.
- [2] KOUKAL, J. ZMYDLENÝ, T. *Svařování I*, VŠB-TU Ostrava. 2005.136.
ISBN 80-248-0870-6
- [3] KOUKAL, J., SCHWARZ, D., HAJDÍK, J. *Materiály a jejich svařitelnost*, Český svářečský ústav s.r.o. Ostrava 2009. 241s. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [4] CHEN, T., WENG, K., YANG, J. *The effect of high-temperature exposure on the microstructural stability and toughness property in a 2205 duplex stainless steel*. Materials Science and Engineering, 2002, pp. 259-270.
- [5] SCHMIDOVÁ, E., ŠVANDA, P., VESELÝ, D., KALEDOVÁ, A. *Mechanism of degradation of stabilized corrosion-resistant steel during the welding cycle*. Anti-Corrosion Methods and Materials, vol. 56, Number 4 2009, str. 206-217.(2009)
ISSN 0003-5599
- [6] PTÁČEK, L. A KOL. *Nauka o material II.*, CEMR Brno 2002.
ISBN 80-7204-248-3
- [7] KOLEKTIV AUTORŮ. *Technologie svařování a zařízení*. 1.vyd. Ostrava: Zeross. 2001. 396 s. ISBN 80-85771-81-0
- [8] HLAVATÝ, I. *Teorie a technologie svařování*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009, poslední revize 20.10.2011. Dostupné z: < <http://fs1.vsb.cz/~hla80> >. ISBN 978-80-248-2414-7.
- [9] NOVÁK, P. *Druhy koroze kovů*. [online]. [cit. 2012-05-02]. Dostupné z WWW: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/predmety/koroze_materialu_pro_restauratory/kadm/pdf/1_2.pdf
- [10] *Mezikrystalová koroze* [online]. [cit. 2012-02-10]. Dostupné z WWW: <http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/koroze_mezikrystalova_koroze/teorie.htm>.
- [11] *Korozivzdorné oceli - vlastnosti*. [online]. Brusel, Belgie: Euro Inox. [cit. 2012-05-02]. Dostupné z WWW: <http://www.euro-inox.org/pdf/map/StainlessSteelProperties_CZ.pdf>
- [12] CUNAT, P. *The welding of Stainless Steels*. [online]. Brusel, Belgie: Euro Inox. [cit. 2012-05-02]. ISBN 978-2-87997-180-3. Dostupné z WWW: < http://www.euro-inox.org/pdf/map/BrochureWeldability_EN.pdf >

- [13] *Welding guide*. [online]. Austria: BÖHLER WELDING. [cit. 2012-05-05].
Dostupné z WWW:
http://www.boehler-welding.com/english/files/Weldingguide_ENG.pdf
- [14] *Správa o atestácii zväracieho drótu EAS 4M-UP v kombinaci s tavidlom BB 202*. 2011. IBOK a.s. Technická správa.
- [15] *Posúdenie vhodnosti zväracích materiálov vybraných značiek Böhler Welding na zváranie strojno-technologických komponentov zariadení určených na dostavbu MO34*. 2009. IBOK a.s. Technická správa.
- [16] *Úrad jadrového dozoru Slovenskej republiky*. [online]. Platné bezpečnostné návody a smernice. [cit. 2012-05-10]. Dostupné z WWW:
<<http://www.ujd.gov.sk/ujd/web.nsf/viewByKeyMenu/Sk-03-04>>.
- [17] *ASTM 321* [online]. Metal Info, [cit. 2011-10-20]. Dostupné z WWW:
<<http://www.metalinfo.com/>>.
- [18] EN 15614-1. *Stanovení a kvalifikace postupu svařování kovových materiálů – zkouška postupu svařování – Část 1: Obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. 2004
- [19] ASTM E562. *Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count*. 2008
- [20] ČSN EN 1011-3. *Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 3: Obloukové svařování korozivzdorných ocelí*. Praha: Český normalizační institut, duben 2002. 23s., ČSN EN 1011-3 A1, Tisková změna, srpen 2004.
- [21] UNUCKA, P., BOŘUTA, A. *Materiálové parametry svařitelnosti vysokolegovaných materiálů*. [online]. 2008. [cit. 2011-11-02]. Dostupné z WWW:
<<http://www.nanocon.cz/data/metal2008/sbornik/Lists/Papers/031.pdf>>
- [22] MARTINEC, J., ŠVELDLER, Z., JANOVEC, J. *Korozivzdorné materiály*. [online], [cit. 2012-02-10]. Dostupné z www:
<http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Korozivzdorn%C3%A9_2007.pdf>
- [23] HAJDÍK, J., HEINRICH, M. *Svařování vysokolegovaných ocelí*. [online], [cit. 2012-02-10]. Dostupné z www:
<http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Sva%C5%99.vysoce.leg1_2007.pdf>
- [24] *Svařování vysokolegovaných ocelí a slitin na bázi niklu*. [online]. [cit. 2012-04-12]. Dostupné z WWW: <http://www.welding.cz/vyvoj/svar_02/02_1-4.htm>

9 Seznam příloh:

Příloha A: Parametry svařovacího materiálu BÖHLER EAS 4 M-UP/B

Příloha B: Dílce pro zkušební svarový spoj

Příloha C: pWPS

Příloha D: Záznam o svařování

Příloha E: Protokol o vizuální zkoušce dle ČSN EN ISO

Příloha F: Protokol o vizuální zkoušce dle BSN II.5.2/2007

Příloha G: Protokol o kapilární zkoušce

Příloha H: Protokol o zkoušce prozářením

Příloha I: Protokol z mechanických zkoušek

Příloha J: Protokol z metalografických zkoušek

Příloha K: Protokol chemického rozboru

Příloha L: WPS